第 30 卷第 4 期　　安 徽 建 筑 大 学 学 报　　Vol.30 No.4
2022 年 8 月　　Journal of Anhui Jianzhu University　　Aug.2022

DOI:10.11921/j.issn.2095-8382.20220406

# 淄博某超高层结构顶部造型收进方式研究

田　超，李鹏飞*，强　霖

（淄博市建筑设计研究院有限公司，山东　淄博　255000）

**摘　要：**因建筑造型所需，针对淄博明发世贸中心大厦超高层建筑顶部造型的收进方案进行比选。介绍了四种常用的建筑造型结构收进处理方式，主要分析其中两种收进方式（转换块收进、斜柱挑梁收进）的节点受力，重点介绍了两种收进方式节点的传力路径、应力、变形等力学特征，并对两种收进方式进行了整体计算参数分析。结果表明，斜柱转换对相关水平构件产生的力仅为转换块产生水平力的 24.62%，转换块收进产生的应力集中现象远大于斜柱收进，对于转换块收进采用加腋措施后应力集中现象仍然较为明显。斜柱收进对结构整体受剪承载力、整体刚度影响并不大，转换块收进则有明显的受剪承载力突变现象。两种收进方式对整体倾覆力矩均无较大影响。最后该工程选用斜柱收进方式，并对整体结构进行抗震分析、结构设计。

**关键词：**超高层建筑；斜柱收进；转换块收进；抗震分析

**中图分类号：**TU318　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**2095-8382（2022）04-035-08

# Comparison and Selection of Structural Setback Schemes for the Rooftop of A Super High-Rise Building in Zibo

TIAN Chao，LI Pengfei，QIANG Lin

（Zibo Architectural Design and Research Institute Co. Ltd，Zibo　255000，China）

**Abstract：**Considering the aesthetics in architecture，the setback schemes for the rooftop of Zibo Mingfa Trade Center Building are compared. Four common structural setback methods are introduced，and two of them （conversion block setback and inclined column setback） are analyzed from the mechanical performance and characteristics，which includes the force transmission path，stress，and deformation of the joints，as well as the overall calculation parameters. The results show that the force generated by the inclined column conversion on the relevant horizontal members is only 24. 62% of the horizontal force generated by the conversion block，and the stress concentration caused by the conversion block is much larger than that of the inclined column，and is still obvious after the axillary for the conversion block setback. The inclined column setback has little effects on the shear bearing capacity and overall stiffness of the structure，while the conversion block setback has obvious sudden changes in the shear bearing capacity. The two schemes have no significant influence on the overall overturning moment. Finally，the project adopts the inclined column setback scheme，and the seismic analysis and structural design of the structure are carried out.

**Keywords：**super high-rise building；inclined column setback；conversion block setback；seismic analysis

随着经济发展，超高层建筑造型逐渐多样化，超高层顶部收进造型较为普遍。常见的造型收进方式有转换梁上起柱内收进、转换块内收进、楔形内收进柱、斜柱挑梁内收进[1]。以上四种收进方式均会在不同程度上造成结构刚度突变、受剪承载力突变等问题，且转换节点受力复杂。目前，有学者

**收稿日期：**2021-09-20

**基金项目：**山东省自然科学基金青年项目（ZR2020QE148）

**作者简介：**田超（1982-），男，本科，高级工程，研究方向：结构工程；

**通讯作者：**李鹏飞（1990-），男，硕士，中级工程师，研究方向：结构工程。E-mail：syn_qut@163.com

针对不同工程中搭接柱转换结构进行了有限元分析[2-4]。其中，任恩辉等[5]针对深圳某超高层建筑搭接转换柱组节点进行了数值模拟分析，得到搭接转换柱受力本质仍是斜柱的结论，为减少产生偏心向的弯矩，采取设置适宜刚度的腰桁架等措施。包联进等[6]研究退台式建筑外框柱和核心筒的不同收进方式，涉及了竖向构件收进、塔楼出现偏心以及刚度突变等情况。

本文针对淄博某超高层项目顶部造型收进方案，通过分析不同方案的受力特性以及结构整体性能，筛选出最优的顶部收进方案，并针对该收进方案做出抗震性能分析，提出抗震构造措施，以减少收进对结构整体的不利影响，为后续相关工程提供借鉴。

## 1 工程概况

该工程位于淄博市张店区华光路以南、上海路以东。该项目中 1# 塔楼是一座以酒店、办公为主的一类超高层建筑，地下 2 层，地上 56 层，建筑高度 228.9 m，为 B 级高度高层建筑。其中 1~5 层与 2# 楼连通作为酒店使用，层高 5 m；23 层、33 层、45 层为避难层，层高分别为 4.3 m、4.8 m、4.8 m；46 层及以上为酒店用房，层高 3.6 m；其余楼层作为办公使用，层高 4 m。嵌固端为地下室顶板。建筑平面整体呈方形，宽约 45 m。总建筑面积为 16.44 万平方米，地上建筑面积为 15.76 万平方米，地下建筑面积为 0.68 万平方米，效果图见图 1。

图 1 工程效果图

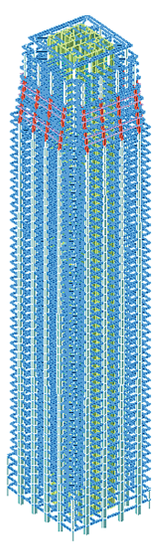


图 2 结构计算模型示意图

建筑所在地地震基本烈度 7 度，设计地震分组为第三组，建筑场地类别为 II 类，抗震弹性分析阻尼比为 0.05。本工程地面粗糙度类别为 B 类，采用 0.44 kN/m$^2$（50 年一遇基本风压乘以 1.1 倍放大系数）用于结构承载力验算；采用 0.4 kN/m$^2$（50 年一遇基本风压）用于变形验算；采用 0.3 kN/m$^2$（10 年一遇基本风压）用于舒适度验算；计算风荷载时，结构阻尼比取为 0.04。

## 2 顶部造型收进方案受力分析

因建筑造型所需，在标高 200.7 m、211.5 m 有较明显收进。该项目在 50~52 层（标高 200.7 ~211.5 m）相较 49 层（标高 197.1 m）立面收进 1.5 m，53~55 层（标高 211.5~222.3 m）相较 52 层（标高 207.9 m）立面收进 1.5 m。结构计算模型如图 2 所示，结构平面布置如图 3 所示，顶部建筑收进如图 4 所示。

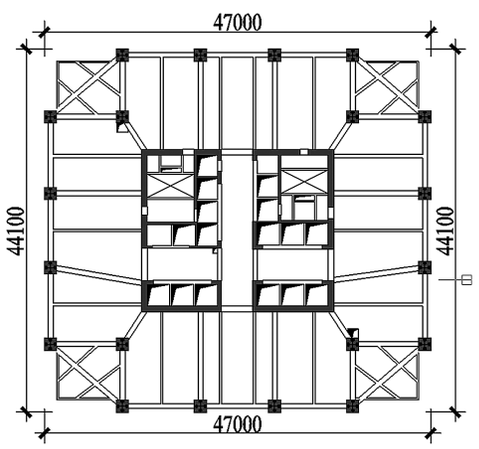



图 3 结构平面布置图

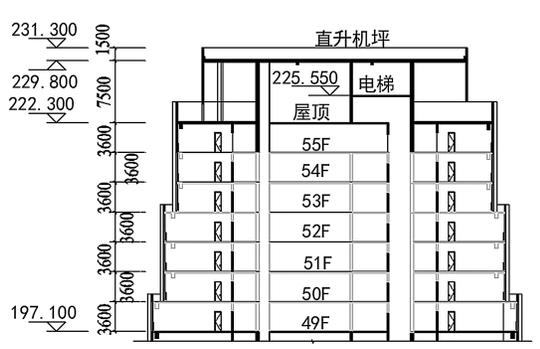
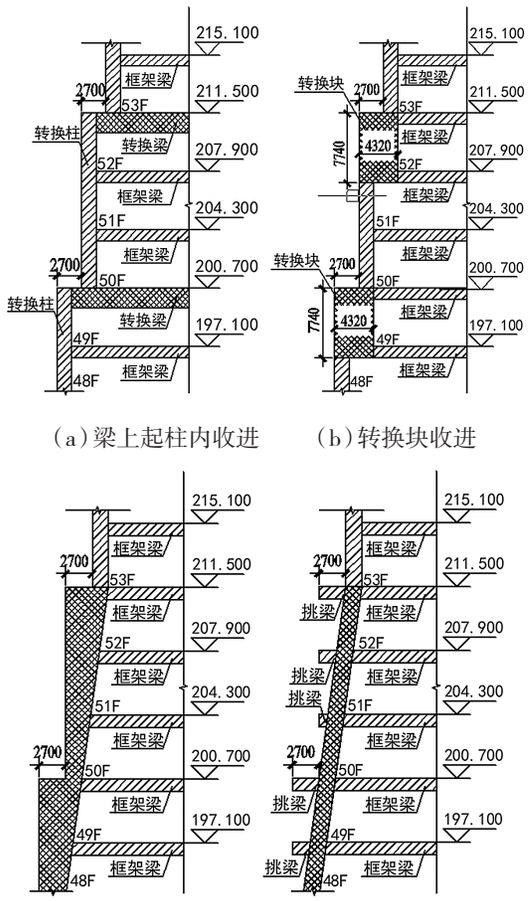



图 4 顶部建筑收进示意图

常见建筑造型收进的结构处理形式主要分为四种，分别是转换梁上起柱内收进、转换块内收进、

楔形内收进柱、斜柱挑梁内收进。以上四种收进方式如图 5 所示。




（a）梁上起柱内收进　（b）转换块收进

（c）楔形块收进　（d）斜柱挑梁收进

**图 5　造型收进常用的结构处理形式**

本项目转换部位层高 3.6 m，若采用转换梁进行转换，梁高需做至 1.2 m，影响建筑功能。转换梁刚度突变大、自重大、用料多，从经济型、实用性、安全性方面否定梁上起柱方案。楔形块收进、斜柱挑梁收进属于异形竖向传力构件收进，两者受力模式相似。斜柱挑梁收进受力更为明晰，且外伸挑梁可平衡梁端弯矩，悬挑部分空间可被利用，故从经济型、实用性、安全性方面否定楔形块收进方案。由此，本文主要针对转换块收进、斜柱挑梁收进进行受力分析，择优选择适宜方案。

### 2.1　转换块收进方式收进节点受力分析

若采用转换块方式收进，则选择受力较大的 49 层转换块为例，使用 midas FEA 建模、划分单元后导入 midas Gen 进行有限元节点分析。上述分析节点受力特性的方法可以真实模拟构件计算长度、荷载及边界条件。建立转换块上下柱的截面均为 900 mm × 900 mm，与转换块相连的框梁截面为 400 mm × 750 mm，转换块尺寸为 900 mm × 2 400 mm × 3 600 mm，高度同层高。建立的节点采用有限元建模并划分网格，材料及荷载据实输入，考虑结构综合受力，暂不考虑刚性楼板作用。

依据《建筑抗震设计规范》（下简称《抗规》）GB50011-2010[7]，在地震作用下，即 1.2 × （1.0D+0.5L）+1.3EX 工况：转换块有效应力云图如图 6 所示，可以发现转换块中力流传递明显，从上柱向下柱斜对角传力。柱为主要受力构件，柱与转换块交接处为主要受力部位，存在明显的应力集中现象，转换块与下柱交接处应力明显高于其与上柱交接处应力。转换块变形前后如图 7 所示。

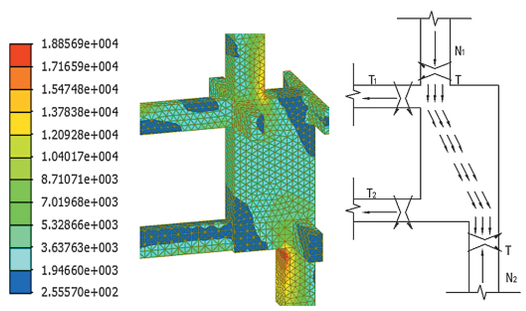
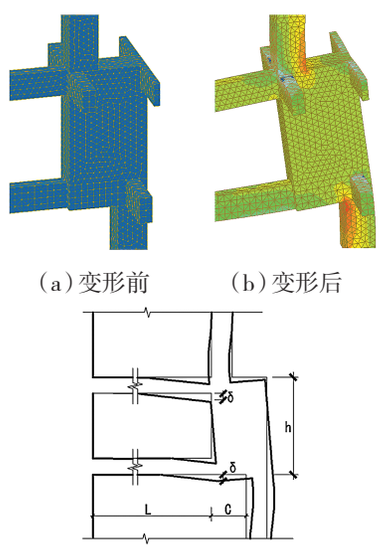



**图 6　转换块有效应力云图（MPa）**




（a）变形前　（b）变形后

（c）结构变形示意

**图 7 转换块变性前后对比图**

通过式（1）~（3）可分析转换块上下柱内力与应力值（表 1）、水平中震组合工况转换块上下层水平内力与应力值（表 2）。

$$N \approx \frac{(\sigma_1+\sigma_2)}{2}bh \tag{1}$$

$$M \approx \frac{(\sigma_1-\sigma_2)}{2}W = \frac{bh^2(\sigma_1-\sigma_2)}{12} \tag{2}$$

$$V \approx \tau bh \tag{3}$$

式中 $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ 为柱截面边缘应力，$\tau$ 为剪应力。

**表 1　水平中震组合工况转换块上下柱内力与应力**

| 项目 | 有限元结果 | | PKPM 计算结果 | |
|---|---|---|---|---|
| | 上柱底部 | 下柱顶部 | 上柱底部 | 下柱顶部 |
| $\sigma_1$ 外侧（N/mm²） | −19.3 | 1.12 | — | — |
| $\sigma_2$ 内侧（N/mm²） | 1.38 | −21.6 | — | — |
| $\tau$（N/mm²） | 3.2 | 3.8 | — | — |
| 轴力 $N$（kN） | 7 257.6 | 8 294.4 | 7 135.2 | 7 921.6 |
| 弯矩 $M$（kN·m） | 1 240.5 | 1 396.04 | 1 103.6 | 1 186.9 |
| 转换块剪力 | 11 340 | | 7 920 | |

**表 2　水平中震组合工况转换块上下层水平内力与应力**

| 项目 | 有限元结果 | | PKPM 计算结果 | |
|---|---|---|---|---|
| | 上层梁 | 下层梁 | 上层梁 | 下层梁 |
| $\sigma_1$ 上侧（N/mm²） | 9.65 | −0.81 | — | — |
| $\sigma_2$ 下侧（N/mm²） | 0.83 | 12.93 | — | — |
| $\tau$（N/mm²） | 2.75 | 2.86 | — | — |
| 轴力 $N$（kN） | 1 572.0 | 1 818.0 | 1 986.5 | 2 130.0 |
| 弯矩 $M$（kN·m） | 165.4 | 227.3 | 198.6 | 257.3 |
| 剪力 $V$（kN） | 825.0 | 858.0 | 913.1 | 952.6 |

徐培福、傅学怡等[4]对框架－核心筒结构中转换块内收进进行理论及实验研究，得到梁水平力计算公式：

$$T \approx N_{上}C/\mathrm{h} \tag{4}$$

读取 PKPM 计算软件数值，该转换块 $N_{上}$=5 154.2 kN，$C$=1.5 m，$h$=3.6 m，$L$=8.4 m，$A_{上}$=$A_{下}$=0.3 m²。代入式（4），经计算 $T$=2 147.58 kN。有限元计算上端水平梁 $T_{上}$约为 1 572.0 kN，下端水平梁 $T_{下}$约为 1 818.0 kN，且有限元分析结果与该公式结果基本吻合，与经验公式产生误差的主要原因是结构变形使得内力产生变化。

水平向正应力云图如图 8 所示，可以发现与转换块相连的两层梁均为梁端下部受拉，且转换块下层梁受力明显大于上层梁受力。下层梁在靠近转换块端部位置处梁整截面受拉。垂直向正应力云图如图 9 所示，上下柱都以受压为主，与转换块相接处下柱应力集中更为明显，上柱有明显受拉区产生，受力模式均为大偏心受压。转换块剪应力如图 10 所示，发现剪应力计算可忽略梁作用，以上下柱内力计算转换块剪切效应，该计算方式与有限元分析结果相吻合。

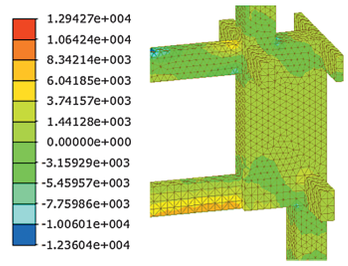



**图 8　转换块水平向应力云图（MPa）**

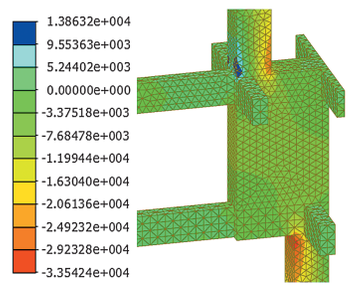



**图 9　转换块垂直向应力云图（MPa）**

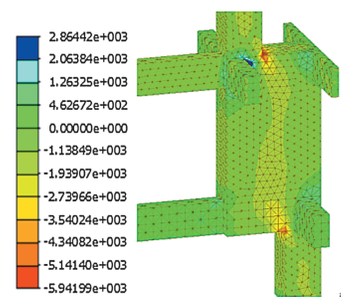
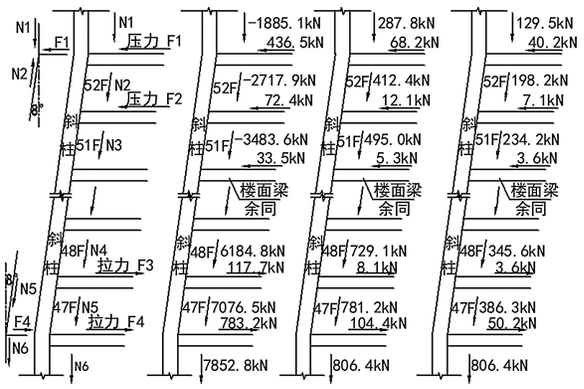



**图 10　转换块剪应力云图（MPa）**

有限元计算出上下柱与转换块相接处的轴力、弯矩与 PKPM 计算结果基本吻合，转换块剪应力宜选上下柱轴力较大值作为转换块所受剪力。转换块与柱相交部位存在明显的应力集中现象，故对节点加腋处理，以减少应力集中对结构的不利影响。

### 2.2　斜柱收进上下端节点受力分析

若采用斜柱方式收进，受力分析如图 11（a）所示，假如考虑构件为刚度无限大的杆系单元，仅考虑上柱传下的轴力，不考虑梁柱弯矩影响，斜柱最上端水平力 $F_1$=$N_2$×sin8°，斜柱最下端水平力 $F_4$=$N_5$×sin8°。通过 PKPM 计算分析不考虑刚性楼板假定的斜柱在恒＋活工况、水平地震工况（中震）、竖向地震工况（中震）大致受力情况如图 11（b~d）所示。




（a）斜柱受力分析图　（b）横 + 活工况

（c）水平地震工况（中震）　（d）竖向地震工况（中震）

**图 11　斜柱及相邻构建轴力图**

若仅考虑恒 + 活工况，构件无限刚假定下，斜柱上下端梁水平力理论值与分析值对比见表 3。

**表 3　水平中震组合工况斜柱上下节点处水平梁内力**

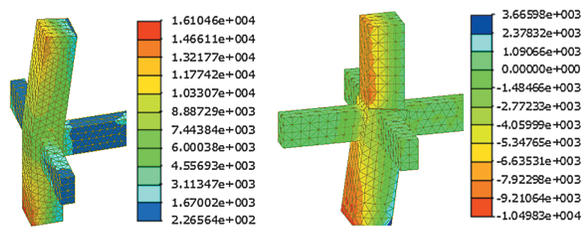
| 位置 | 理论值 /kN | PKPM 分析值 /kN | 相差比例 |
|---|---|---|---|
| 斜柱顶端水平梁 | 378.26 | 436.5 | +15.4% |
| 斜柱底端水平梁 | 984.86 | 783.2 | −25.7% |

若仅考虑恒 + 活工况，构件无限刚假定下，与斜柱相接梁的水平力，除斜柱上下端梁外，其余各层梁水平力均为 0。PKPM 分析值，除斜柱上下端梁外，其余各层梁均存在微弱的水平力轴，与斜柱相连水平梁的轴力由斜柱两端向中间递减。

因与斜柱上端相连的梁为压弯构件，与斜柱下端相连的梁为拉弯构件，梁柱节点存在复杂受力，故选择斜柱上下端节点使用 midas FEA 建模、划分单元后导入 midas Gen 进行有限元分析、结构整体性能分析。该项目斜柱尺寸为 900 mm × 900 mm，梁截面尺寸为 400 mm × 750 mm。节点采用有限元建模并划分网格，材料及荷载据实输入，并以刚接节点与原结构节点相关构件刚接，考虑结构综合受力，暂不考虑刚性楼板作用。

在 1.2 × （1.0D+0.5L）+1.3EX 工况下，斜柱上下节点有效应力云图如图 12 所示，通过有限元软件输出应力求得上下柱截面内力（表 4）、上下节点处梁内力（表 5）。PKPM 计算出的节点梁柱内力与有限元整体分析计算应力情况基本吻合。

通过图 12 应力云图、表 4~5 内力分析可以发现斜柱上端节点部位梁以压弯为主，斜柱下端节点梁以拉弯为主。同时斜柱内力会增加相邻垂直柱的大偏压效应，使垂直柱截面应力有较大增幅。与斜柱相交的垂直立柱外侧受斜柱影响较大，且 PKPM 软件计算的柱端弯矩略小于有限元计算结果。




（a）斜柱下端节点　（b）斜柱上端节点

**图 12　斜柱上下端节点有效应力云图（MPa）**

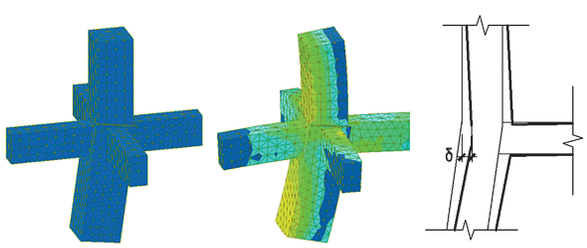
**表 4　水平中震组合工况斜柱上下节点处柱内力与应力**

| 项目 | 有限元结果 | | PKPM 计算结果 | |
|---|---|---|---|---|
| | 斜柱上端部柱 | 斜柱下端部柱 | 斜柱上端部柱 | 斜柱下端部柱 |
| $\sigma_1$ 外侧（N/mm²） | −6.11 | −14.32 | — | — |
| $\sigma_2$ 内侧（N/mm²） | −0.53 | −3.11 | — | — |
| $\tau$（N/mm²） | 3.2 | 3.8 | — | — |
| 轴力 $N$（kN） | 2 124.8 | 7 059.15 | 1 885.1 | 7 852.8 |
| 弯矩 $M$（kN·m） | 238.1 | 681.0 | 191.6 | 596.6 |

**表 5　水平中震组合工况斜柱上下节点处梁内力与应力**

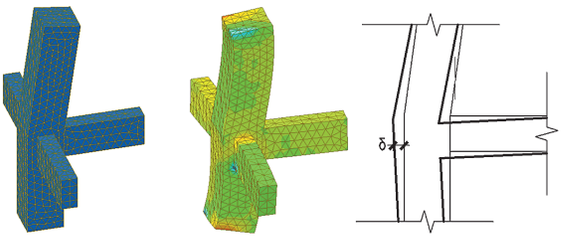
| 项目 | 有限元结果 | | PKPM 计算结果 | |
|---|---|---|---|---|
| | 斜柱上端部梁 | 斜柱下端部梁 | 斜柱上端部梁 | 斜柱下端部梁 |
| $\sigma_1$ 上侧（N/mm²） | 7.71 | 11.52 | — | — |
| $\sigma_2$ 下侧（N/mm²） | −10.51 | −6.71 | — | — |
| $\tau$（N/mm²） | 0.72 | 0.81 | — | — |
| 轴力 $N$（kN） | −420.0 | 721.5 | 436.5 | 783.2 |
| 弯矩 $M$（kN·m） | 341.6 | 341.8 | 452.3 | 486.5 |

斜柱上下节点变形图如图 13、图 14 所示，由图可知节点变形以水平向变形为主，梁的水平刚度直接影响节点变形。




（a）变形前　（b）变形后

**图 13　斜柱上端节点变形图**




(a)变形前　　(b)变形后

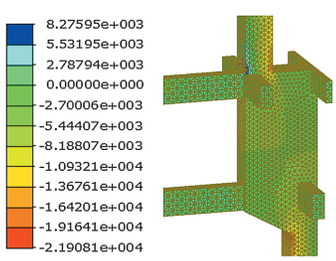
**图 14　斜柱下端节点变形图**

## 3　收紧方案比选及设计措施

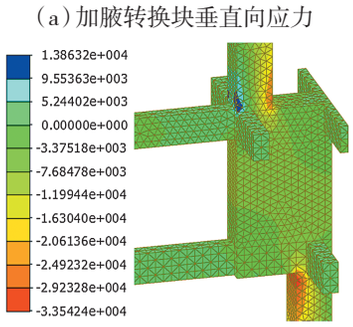
### 3.1　收进方式比选

通过上述分析可发现,不论采取转换收进还是斜柱收进,上层柱的力均能有效传递至下柱,从力流角度分析,两种收进方式传力均较为直接。转换块收进与斜柱收进在传递竖向力的同时,均会对水平梁产生水平力,该力通过水平梁传递至核心筒后耗散。根据上述计算结果,49 层转换块处梁水平力为 2 930 kN,斜柱转换中斜柱上端梁受压与斜柱下端梁受拉,下端水平拉力为 721.5 kN。斜柱转换对相关水平构件产生的力仅为转换块产生水平力的 24.62%。

当转换块收进时,转换块下柱顶部最大压应力为 21.6 N/mm$^2$;斜柱收进时,斜柱最下端部最大压应力为 14.32 N/mm$^2$,转换块收进产生的应力集中现象远大于斜柱收进。对于转换块收进,常采用加腋减少应力集中现象[8-10],因该项目上部为垂直收进,转换块上部柱无法加腋处理,故仅对下部柱加腋。加腋后在 1.2×(1.0D+0.5L)+1.3EX 工况下应力对比见图 15,最大应力为 18.2 N/mm$^2$,较未加腋转换块最大应力有所降低,但应力集中仍很明显。




(a)加腋转换块垂直向应力




(b)非加腋转换块垂直向应力

**图 15　加腋与非加腋转换块垂直向应力对比云图(MPa)**

对两种收进方式 PKPM 整体计算参数分析,楼层受剪承载力如图 16 所示,楼层侧向剪切刚度如图 17 所示,受剪承载力比值如图 18 所示。

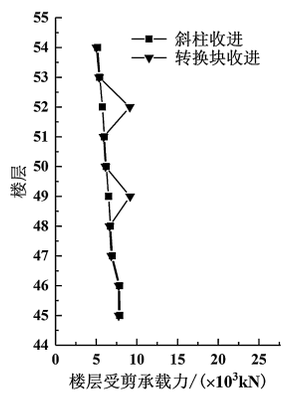



**图 16　楼层受剪承载力**

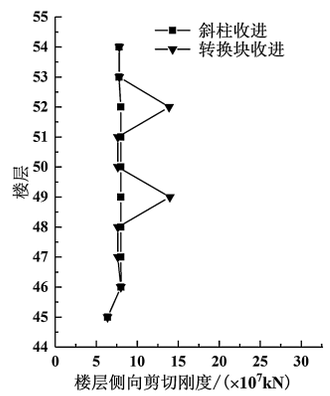



**图 17　楼层侧向剪切刚度**

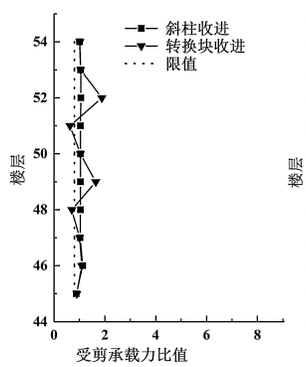



**图 18　受剪承载力比值**

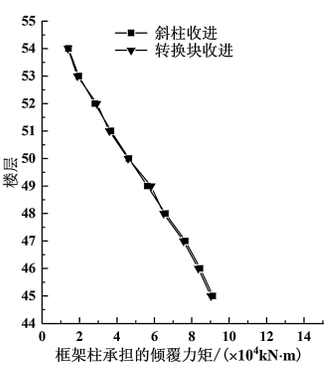



**图 19　框架柱承担的倾覆力矩**

斜柱收进对结构整体受剪承载力、整体刚度影响并不大,在斜柱底端层和斜柱顶端层出现刚度微小变化,并未出现明显的受剪承载力、刚度突升或突降[11]。转换块收进则出现明显的受剪承载力突变现象,48 层与 49 层受剪承载力之比为 0.72,51 层与 52 层受剪承载力之比为 0.68,转换块所在楼层下一层与转换块楼层受剪承载力之比均不满足《高层建筑混凝土结构技术规程》[8,12] 3.5.3 条中“受剪承载力之比不小于 0.8”的规定,转换块所在楼层 49 层、52 层刚度均为下一层刚度的 1.8 倍。

框架柱承担的倾覆力矩如图 19 所示，可以发现不论采用斜柱收进还是转换块收进，对整体倾覆力矩均无较大影响，柱的倾覆力矩随高度增加而平滑递减，且所占整体比例随着高度增加而平滑递增。

剪力分配如图 20 所示，若采用斜柱收进，框架柱和剪力墙所承担的总剪力未出现明显的突变现象，变化趋势均匀，斜柱上下端柱承担的剪力比例略有上升。若采用转换块收进，49 层转换块楼层柱所承担的剪力约比下层增加 38%，52 层转换块楼层柱所承担的剪力约比下层增加 35%，突变现象明显高于斜柱收进。

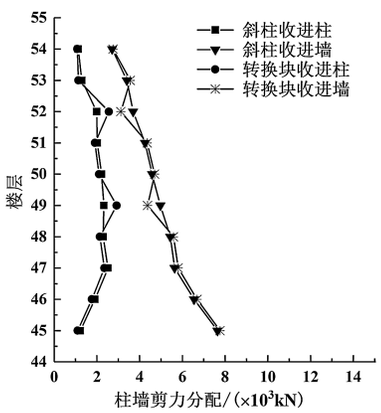



**图 20　柱墙剪力分配**

从节点受力与整体分析角度，斜柱收进方式均优于转换块收进，尤其对于超高、超限建筑，更有利于结构整体抗震。

### 3.2　设计及构造措施

采用 PKPM 建立整体模型，进行多遇地震下弹性时程分析，选取人工波 2 条、天然波 5 条（TH046TG045、TH049TG045、TH087TG045、TH030TG045、TH120TG045），本构关系已在软件中内置。分析结果表明，地震力作用下，1~42 层时程曲线计算的地震剪力平均值小于反应谱计算的地震剪力，43~56 层时程曲线计算的地震剪力平均值大于反应谱计算的地震剪力。设计时，需适当放大 43~56 层地震力。

对斜柱收进模型进行罕遇地震弹塑性时程分析，选取人工波 1 条、天然波 2 条（Chi-Chi_Taiwan-03_NO_2474、NO_2525，弹塑性时程分析后损伤云图见图 21、图 22。由云图可知，斜柱收进并未影响整体结构破坏方式，连梁仍然作为结构抗震第一道防线，在地震作用下能迅速进入损伤阶段，并在整个地震过程中保持耗能作用；随后，顶部部分框架柱和剪力墙出现轻微损伤，斜柱对框架梁损伤有一定影响，斜柱部位框架梁轻微损伤明显多于其余框梁；最后，底部加强区剪力墙出现损伤。罕遇地震作用下最大层间位移角 1/194，满足《抗规》[7] 要求。顶部框架柱出现轻微损坏，但未形成塑性铰，其余框架柱保持良好的工作状态，可以作为二道防线。

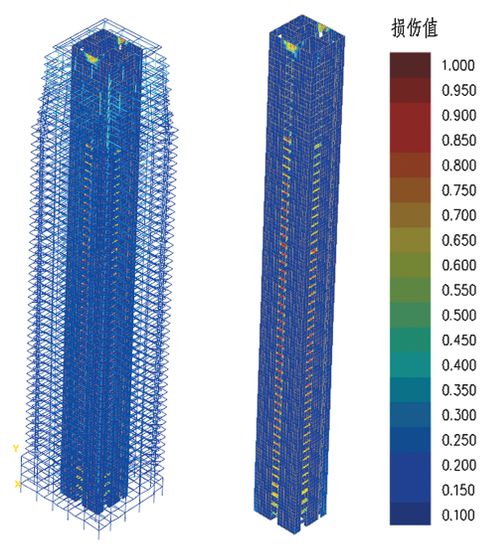



**图 21　Chi-Chi_Taiwan-03_NO_2474 罕遇地震整体受拉损伤云图、剪力墙损伤云图**

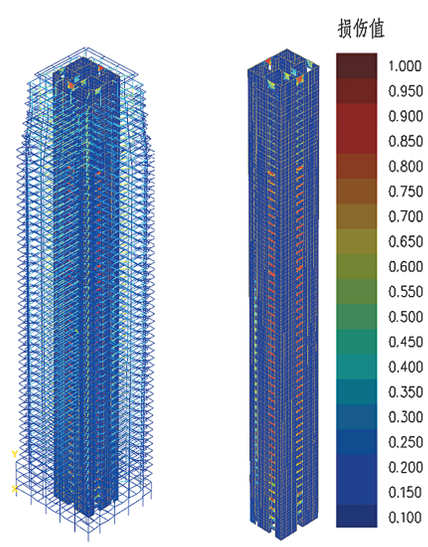



**图 22　Chi-Chi_Taiwan-03_NO_2525 罕遇地震整体受拉损伤云图、剪力墙损伤云图**

通过以上分析，对 47~52 层斜柱（斜角 7.91°）及其上下两层框架柱定义为关键构件进行性能化设计（中震抗剪弹性、抗弯不屈服）。斜柱收进对接近斜柱顶、斜柱底的梁产生较大的水平力，与斜柱顶部相交的水平梁受压，与斜柱底部相交的水平梁受拉。水平向力会通过梁板向核心筒传递，故计算时复核梁内力不考虑刚性楼板作用，并且与斜柱下端相连的受拉梁（弹性膜假定）在考虑竖向地震作用时，将其定义为中震弹性、大震不屈服进行设计。

斜柱顶端、底端楼层板厚度取 180 mm，并提高配筋率以加强板刚度，通过楼板分散斜柱产生的水平力，使水平力向核心筒传递时更为分散，减少水平力对墙体的不利影响。在斜柱下端水平梁内设置型钢，在提高梁抗弯强度的同时，减小斜柱下部柱压弯效应的不利影响，同时与斜柱相连的型钢梁应在内筒尽量向内延伸，以避免过大水平力对内筒产生不利影响。在核心筒体四角及与型钢混凝土梁交接处剪力墙内埋置型钢，并增加墙体含钢量。

## 4 结语

（1）明发世贸中心超高项目顶部立面收进，采用斜柱收进、转换块收进均能很好地实现建筑意图，提高建筑利用率。

（2）斜柱收进、转换块收进均有明显的力流传递路径，斜柱收进力流更为直接。两种收进方式在收进节点位置均会产生应力集中，应力集中在结构设计时不容忽视，斜柱收进产生的应力集中现象比加腋后的转换块更小。

（3）转换块收进在转换位置会产生刚度突变，对结构整体抗震不利。相比于转换块收进，斜柱收进整体刚度、受剪承载力变化更为均匀，整体性更优异，因此，超高建筑立面收进更推荐使用斜柱收进。斜柱收进楼层及其上下两层框架柱宜定义为关键构件进行性能化设计（中震抗剪弹性、抗弯不屈服）。

（4）斜柱收进宜补充多遇地震下弹性时程分析，斜柱收进可能导致时程曲线计算的地震剪力平均值小于反应谱计算的地震剪力，此时需适当放大斜柱收进层地震力。

（5）斜柱收进对斜柱顶、斜柱底产生较大的水平力，与斜柱顶部相交的水平梁受压，与斜柱底部相交的水平梁受拉。斜柱收进会增加相邻垂直柱的大偏压效应，使得相邻柱截面应力出现较大增幅。故计算时复核梁内力应不考虑刚性楼板作用，在斜柱下端水平梁内设置型钢，在提高梁抗弯强度的同时，减小斜柱下部柱压弯效应的不利影响，同时与斜柱相连的型钢梁在内筒尽量向内延伸，避免过大水平力对内筒产生不利影响。

**参考文献：**

[1] 宋涛炜，冯远，何建波，等 . 某 345m 超高层建筑结构转换柱设计研究 [J]. 建筑结构，2020，50（19）：56–61，92.

[2] 邹安宇 . 建筑结构层间搭接柱转换结构设计 [J]. 科技创新导报，2019，16（9）：153，155.

[3] 顾磊，傅学怡 . 福建兴业银行大厦搭接柱转换结构有限元分析和预应力策略 [J]. 建筑结构，2003，33（12）：13–16.

[4] 徐培福，傅学怡，耿娜娜，等 . 搭接柱转换结构的试验研究与设计要点 [J]. 建筑结构，2003，33（12）：3–7.

[5] 任恩辉，张伟生，黄诚为，等 . 深圳某超高层搭接转换柱组节点 ABAQUS 详细分析 [J]. 广东土木与建筑，2019，26（3）：6–8，16.

[6] 包联进，陈建兴，王鑫，等 . 退台式收进体型超高层建筑结构设计 [J]. 建筑结构，2019，49（13）：7–12.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部，国家质量监督检验检疫总局 . 建筑抗震设计规范：GB 50011—2010[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2010.

[8] 刘锋，吴翔艳，吴琨，等 . 上都阁楼结构设计 [J]. 建筑结构，2017，47（22）：43–46.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部 . 高层建筑混凝土结构技术规程： JGJ 3—2010[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2011.

[10] 傅学怡，雷康儿，杨想兵，陈朝晖，顾磊，贾建英 . 福建兴业银行大厦搭接柱转换结构研究应用 [J]. 建筑结构，2003，33（12）：8–12.

[11] Duan X N，Tang N，Chen X T，et al. Lateral stiffness optimization in structural scheme design of a super high-rise building in 0.30g seismic fortified regions[J].Applied Mechanics and Materials，2013，275/276/277：1184–1189.

[12] Dong Y N，Yin S H. New construction technique applied in super high rise concrete structure – wanxin building in Shenyang，China[J].Advanced Materials Research，2012，424/425：1293–1296.